

DİZEL MOTORLARINDA AZOT OKSİT (NO_x) KONTROL YÖNTEMLERİ**Can HAŞİMOĞLU^a, Yakup İÇİNGÜR^b****^aS.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, 42031 Kampüs, KONYA****^bG.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, 06500, ANKARA****ÖZET**

İçten yanmalı motorlarda yanma odasındaki maksimum sıcaklık 1800 K'in üzerine çıktığında, havanın içindeki azot ve oksijen kimyasal olarak birleşerek, azot oksit (NO_x) denilen, insan sağlığına ve çevreye zararlı bir gaz haline dönüşür. Dizel motorlarının hava fazlalığı ile çalışması, benzin motorlarına göre NO_x oluşturma potansiyelini artırır. Bu çalışmada dizel motorlarından kaynaklanan NO_x emisyonlarının azaltılması ele alınarak, günümüz dizel motorlarında kullanılan NO_x kontrol yöntemleri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: dizel motoru, egzoz emisyonu**NO_x CONTROL STRATEGIES FOR DIESEL ENGINES****ABSTRACT**

When temperature of combustion chamber rises beyond 1800 K in an internal combustion engine, nitrogen and oxygen of air combine chemically and become a gas called nitrogen oxide (NO_x) which is harmful for human health and environment. Diesel engines use excess air for combustion, this increases nitrogen oxide production potential according to the spark ignition engines. In this study reducing of NO_x emissions causes from diesel engines was discussed and the NO_x emission control strategies which are used today were investigated.

Key words: diesel engine, exhaust emission**1. GİRİŞ**

İçten yanmalı motorlarda fosil kaynaklı yakıtların aşırı kullanımı sonucu atmosferdeki taşıt kaynaklı hava kirliliği günümüzde insan sağlığı ve çevre bakımından tehlikeli boyutlara ulaşmıştır. Gelişmiş ülkelerde taşıt kaynaklı emisyonlara ciddi sınırlamalar getirilmiştir. Bu sebeple araştırmacılar taşıt kaynaklı emisyonların azaltılması konusunda yoğun çalışmalar yapmaktadırlar.

Ülkemizde olduğu gibi yolcu ve yük taşımacılığın büyük bir bölümünün kara yolu taşıtları ile yapıldığı ülkelerde bu durum ayrı bir önem arz etmektedir. Yolcu ve yük taşımacılığında kullanılan taşıtların büyük çoğunluğunda dizel motorları kullanılmaktadır. Bu yüzden dizel motorlarından kaynaklanan emisyonların azaltılması gerekmektedir.

Dizel motorlarından kaynaklanan en önemli iki emisyon; partikül madde (PM) ve azot oksit (NO_x) emisyonlarıdır. Dizel motorlarının hava fazlalığı ile çalışmaları benzin motorlarına göre NO_x oluşturma potansiyellerini arttırmaktadır. Benzin motorlarından atmosfere atılan bir ton egzoz gazının 18,42 kg'ı NO_x iken, dizel motorlarında bu miktar 123,71 kg'a ulaşmaktadır (1).

Bu amaçla bu araştırmada dizel motorlarından kaynaklanan NO_x emisyonlarının oluşumu ve kontrol yöntemleri üzerinde durulacaktır.

2. DİZEL MOTORLARINDA AZOT OKSİT EMİSYONU

Azot, sekiz farklı oksit oluşturmaya rağmen hava kirliliği bakımından NO (azotmonoksit) ve NO_2 (azotdioksit) en önemlileridir (2,3). NO_x 'ler genellikle 1800 K'in üzerindeki yüksek sıcaklıklarda oluşmaktadırlar. Karışım içindeki havanın yüksek sıcaklıkta iyonize olması ile açığa çıkan azot nedeniyle oluşan tehlikeli NO_x emisyonlarını azaltabilmek için silindir içi sıcaklığın azaltılması gerekir (4,5).

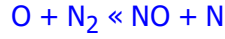
Dizel motorlarında yanma sonucu, içerisinde azotoksitin de bulunduğu egzoz emisyonları oluşur. Azotoksitin hacimce yaklaşık % 90'ı NO, %5'i NO_2 , ve kalan %5'i N_2O (diazotmonoksit), N_2O_3 (diazottrioksit) ve N_2O_5 'ten (diazotpentaoksit) oluşur. Çevre şartlarında NO- NO_2 dengesi NO_2 oluşturacak yöndedir. Egzoz gazlarının akış hızının yavaş olması durumunda dizel egzozundaki NO, NO_2 'ye dönüşecektir (6,7).

2. 1. NO_x Oluşum Mekanizması

Genelde stokiometrik orana yakın hava yakıt karışımlarında yanma sırasında NO oluşur. NO oluşum hızı alevin geçmiş olduğu bölgelerdeki gaz sıcaklığına ve karışım oranına bağlıdır. Isı açığa çıkma hızının artması NO

oluşumunu arttıracaktır. Stokiyometrik karışımlardaki NO oluşumu maksimum iken karışım zenginleşip fakirleştikçe oluşan NO miktarı da azalır (8,9).

Yanma olaylarında oluşan NO için Zeldovich mekanizmasına göre $O_2 \ll 2O$ oluşunca zincir teşkil eden serbest radikallerde NO doğmaktadır;



Bu arada alevin son yanma bölgesinde NO teşekkülü başlamadan önce esas yanma reaksiyonlarının dengeye ulaştığı kabul edilebilir. Yukarıdaki mekanizma hava fazlalık katsayısı (HFK) 0,8'den büyük olan zenginlikte veya fakir karışımlar için geçerlidir. HFK \leq 0,8 ise ilave olarak ;



NO alev cephesinin hem önünde, hem de arkasında oluşur. Motorda yanma yüksek basınç altında olduğundan alev bölgesi çok incedir ($\sim 0,1$ mm) ve alevin bu bölgede bulunma zamanı çok kısadır. Yakıtın erken püskürtülmesi sonucu karışım yanarken sıkıştırma işlemi devam edeceğinden, alev cephesinin geçmiş olduğu bölgedeki karışımın sıcaklığı yanmadan sonra bile artacaktır. Bu yüzden alev cephesinin geçmiş olduğu bölgelerde, alev cephesinin önündeki bölgeye göre daha fazla NO oluşacaktır.

Alev bölgesinde oluşan NO aşağıdaki reaksiyonla atmosferde NO_2 'ye dönüşecektir;



2. 2. NO_x ' in İnsan Sağlığına Etkisi

NO, NO_2 , N_2O_2 (diazotdioksit) ve benzeri bileşiklerin tümü NO_x olarak tanımlanmaktadır. Azot oksitler kandaki hemoglobin ile birleşmektedir. Ciğerdeki nemle birleşerek nitrik asit oluştururlar. Oluşan asit miktarının konsantrasyonunun azlığı nedeniyle etkisi de az olmaktadır. Ancak zamanla birikerek solunum yolu hastalıkları bulunan kişiler için tehlike oluşturmaktadır (10).

Azot oksitler içinde NO ; kokusuz bir gazdır. Akciğerlerin çalışmasını bozar, mukoza zarını tahriş eder ve felç yapıcı etkisi vardır. Nitrik asit oluşumuna sebep olur. Çevre koşullarında kararsızdır ve oksijenle birleşerek NO_2 'ye

dönüşür. Maksimum işyeri atmosferi değeri (MAK) 9 mg/m³ tür.

NO₂ ; keskin kokulu kırmızı kahverengi karışımı bir gazdır. Düşük yoğunlukta olması halinde bile akciğeri tahriş eder, dokulara ve mukoza zarına zarar verir. MAK değeri 9 mg/m³ tür (11).

3. NO_x EMİSYONLARININ AZALTILMASINDA DİKKATE ALINAN TEMEL PARAMETRELER

Dizel motorlarında oluşan NO_x emisyonlarını azaltmak için aşağıdaki bazı temel parametrelerden yararlanılır.

3.1. Yakıt Enjeksiyon Sistemi Özellikleri

Yakıt enjeksiyon sistemi özellikleri hava ile yakıtın karışması ve yanmasına etkir. Çalışma şartlarında alevin oluşumu ve yayılması, yakıtın atomizasyonu ve yakıt dağıtımı, enjeksiyon sistemi özelliklerinden etkilenir.

Tutuşma gecikmesi süresince püskürtülen yakıtın azaltılması NO_x emisyonlarını azaltır. Bunun için enjektör delik çapı küçültülerek, püskürtme süresi uzatılmakta ve pilot yakıt miktarı azaltılmaktadır. Bu durumda yakıt ile hava daha iyi karışacağından kullanılan hava miktarı artar ve alev daha geniş bölgeye yayılır. Sonuçta NO_x emisyonlarında artış görülür. Püskürtülen yakıt miktarının azaltılması ile NO_x emisyonlarında elde edilen azalma bu nedenden dolayı dengelenecek ve NO_x emisyonlarında bir değişim gözükmeyecektir. Bunun için püskürtme basıncı artırılarak ve setan sayısı daha fazla olan yakıt kullanılarak, tutuşma gecikmesi kısaltılmalıdır (12,13).

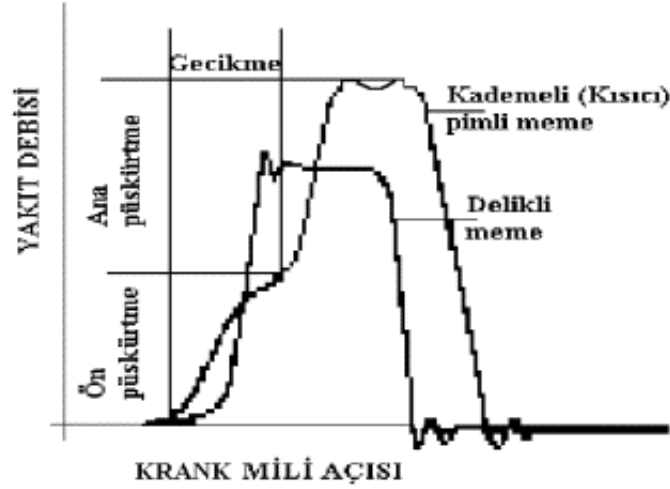


Şekil 1 Kademeli (kısıcı) Pimli Meme ve Püskürtme Şekli (15).

Yakıtın kademeli püskürtülmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Burada önemli olan ilk kademedeki püskürtülecek olan yakıt miktarıdır. Yakıtın iki kademedeki püskürtülmesi ile PM emisyonlarında önemli artış olmadan NO_x azaltılmıştır (14).

Şekil 1’de Kademeli (kısıcı) pimli meme ve püskürtme şekli görülmektedir. Püskürtmenin başlangıcında pimin silindirik kısmı meme deliği içindedir ve yakıtın geçeceği kesit dardır. Dolayısıyla silindire daha az yakıt püskürtülür. Püskürtülen yakıt miktarı, iğne yukarıya kalktıkça artar. Çünkü pimin silindirik kısmı meme deliğinden çekildikçe,

yakıtın geçtiği kesit büyümektedir (15).

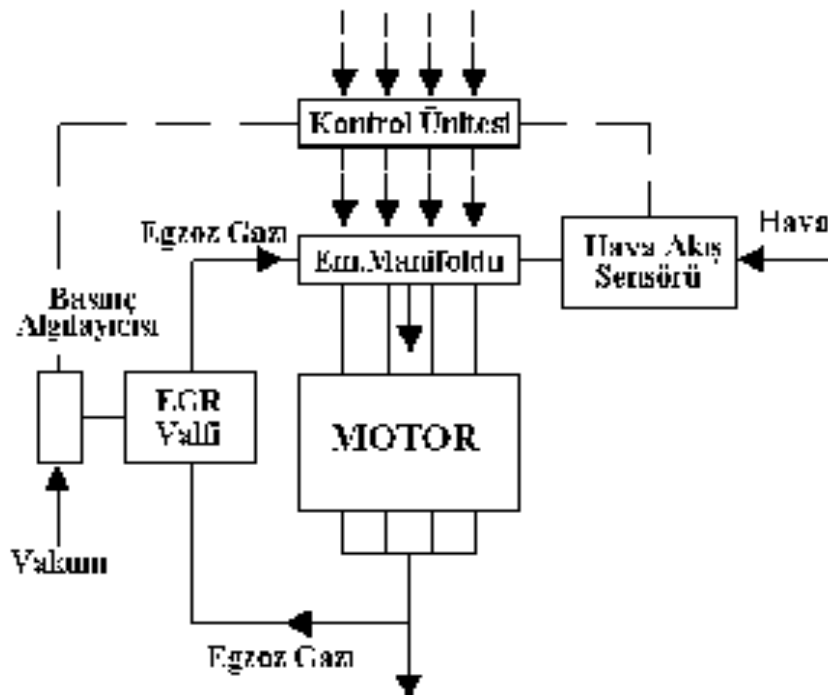


Şekil 2 Krank Mili Açısına Bağlı Olarak Püskürtülen Yakıt Debisi (16).

Şekil 2’de kademeli (kısıcı) pimli memeden püskürtülen yakıt miktarının krank mili açısı ile değişimi görülmektedir. Başlangıçta püskürtülen yakıt miktarı az iken iğne yukarı kalktıkça püskürtülen yakıt miktarı da artacaktır. Böylece tutuşma gecikmesi süresince püskürtülen yakıt miktarı azaltılarak, maksimum basınç ve buna bağlı olarak NO_x emisyonları da azalacaktır (16).

3.2. Egzoz Gazları Resirkülasyonu (EGR)

Yanma sırasında oluşan NO_x miktarı büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Yanma odası içindeki karışımın egzoz gazları ile seyreltilmesi sonucu yanma sonu sıcaklıkları, dolayısıyla üretilen NO_x miktarı azalmaktadır. Şekil 3’de egzoz gazları resirkülasyonu (EGR) sisteminin devre şeması görülmektedir.



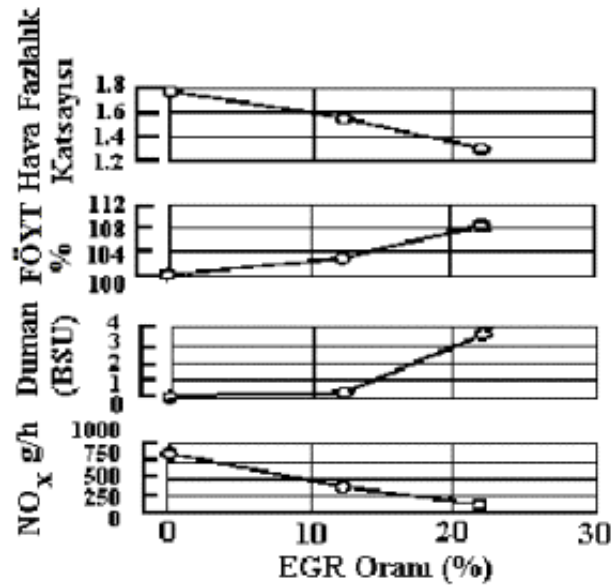
Şekil 3. EGR Devre Şeması (11).

Bu sistemin işlevi egzoz gazlarını silindirlere geri göndererek karışım içerisindeki oksijen konsantrasyonunu azaltıp, karışım oranını azaltmak ve silindir gazlarının ısı kapasitesini yükselterek maksimum gaz sıcaklığını azaltmaktır (17).

EGR direk püskürtmeli dizel motorlarında yakıt ekonomisini kötüleştirmeden NO_x emisyonlarını azaltmanın en iyi yollarından birisidir. Uzun zamandır hafif hizmet tipi dizelerde başarı ile kullanılmasına karşılık, orta ve ağır hizmet tipi dizelerde motorun aşınmasını arttırdığından dolayı bazı sorunlar açığa çıkmaktadır.

Yanmış gazların sıcaklığı maksimum iken NO_x oluşma ihtimali de artar. Bu maksimum sıcaklık, yanma başlangıcı ve maksimum silindir basıncı oluşmasından hemen sonra oluşmaktadır. Erken yanmaya başlayan karışımın sıcaklığı, piston sıkıştırmaya devam ettiği için yükselecektir. Dolayısıyla NO_x oluşum hızı da artacaktır.

Motorlarda NO_x , son alev cephesindeki sıcak gazlarda oluşur. NO_x ' in başlangıçtaki oluşum hızı kısmen sıcaklığa bağlıdır. Oksijen yoğunluğunun yüksek olması da NO_x oluşum hızını artırır. EGR ile silindir içindeki oksijenin bir kısmının yerini atık karbondioksit (CO_2) ve su (H_2O) alacağından lokal oksijen yoğunluğu azalacaktır. Bu durum yakıt ve oksijen moleküllerinin buluşup reaksiyona girme ihtimalini azaltır. Buna bağlı olarak reaksiyon hızı ve lokal alev sıcaklığı düşerek, NO_x oluşumu azalacaktır.

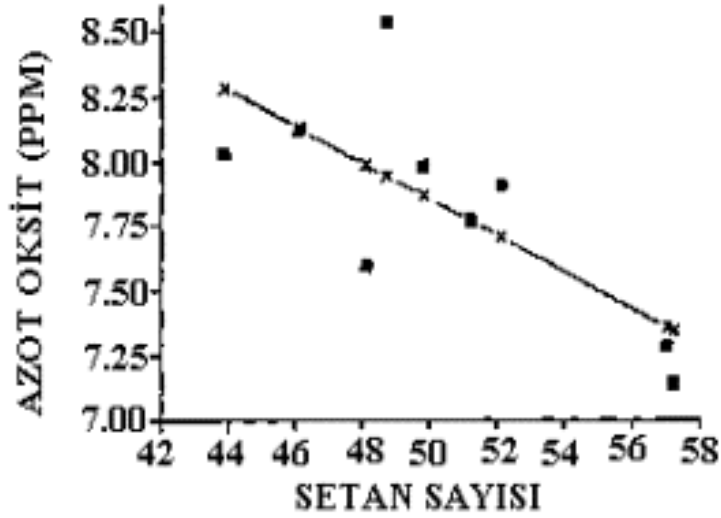


Şekil 4. EGR Oranına Bağlı Olarak NO_x Değişimi (19).

EGR ile yanma odasının farklı bölgelerindeki lokal sıcaklıklar değiştirilmiş olur. Bu da yakıtın buharlaşma hızına ve ısı oksidasyon hızına etki eder. ısı oksidasyon hızı lokal sıcaklığın artması ile kısmen artar. EGR'nin neden olduğu alev sıcaklığındaki azalma oksidasyon hızının azalmasına ve ısı oluşumunun artmasına yol açar. EGR ile silindir giriş sıcaklığı artacağından yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonları azalmaktadır (18). Şekil 4'de orta hızda ağır yük

altındaki aşırı doldurmalı ve ara soğutuculu bir dizel motoruna EGR uygulandığı zamanki test sonuçları gösterilmiştir. %10 EGR civarında duman ve fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT) fazla artmamıştır. EGR oranı arttıkça NO_x azalır, fakat hava fazlalık katsayısının (HFK) azalmasından dolayı is ve yakıt tüketimi kötüleşmektedir (19). Dolum havası içindeki oksijen miktarı azaldıkça CO emisyonları artacaktır. Oksijen miktarı çok azalmadıkça EGR yakıt ekonomisini kötüleştirmeyecektir. Aşırı EGR hava yakıt oranını bozacağından PM ve is emisyonları artar. Silindirlere geri gönderilen egzoz gazları soğutularak yada püskürtme basıncı artırılarak PM ve is oluşumu azaltılabilmektedir (20,21).

3.3. Yakıt Kalitesi

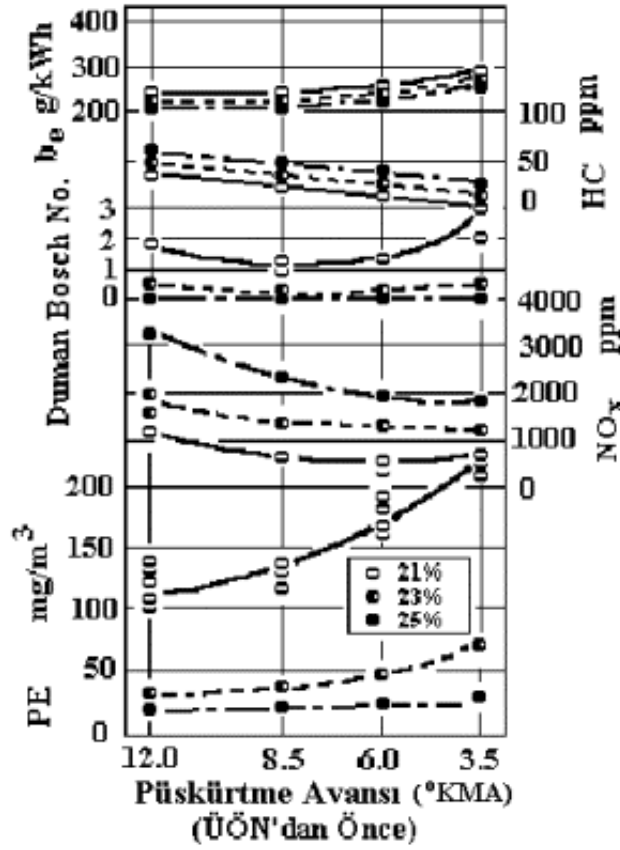


Şekil 5 Setan Sayısının NO_x 'e Etkisi (23).

Dizel yakıtında en önemli özellik setan sayısıdır. Setan sayısı yakıtın dizel motorunda sıkıştırma sonucu ısınan havanın içinde kendi kendine tutuşma özelliğini belirleyen bir sayıdır. Şekil 5'te Setan sayısının NO_x 'e Etkisi görülmektedir. Setan sayısının fazla olması tutuşma gecikmesi periyodunu azaltmakta ve yanma odasında biriken yakıtın ani yanması ile oluşan hızlı basınç artışını önlemektedir. Yakıt daha erken tutuşarak yanmaya başlayacaktır. Fakat bu sırada sıkıştırma devam ettiği için silindir içi sıcaklık ve buna bağlı olarak NO_x oluşumu artacaktır. Bu yüzden yanma başlamadan önce daha az yakıt püskürtülmelidir. Böylece üst ölü nokta (ÜÖN) civarında yanan yakıt miktarı azalacağından maksimum yanma sıcaklığı düşecektir (10,22).

3. 4. Oksijen Konsantrasyonu

Karışım içindeki oksijen konsantrasyonu artırıldıkça PM ve yanmamış HC emisyonları azalır. Şekil 6'da Püskürtme Avansına Bağlı Olarak (%110 Yükte) Oksijen Konsantrasyonunun Emisyonlara ve Yakıt Tüketimine Etkisi görülmektedir. % 2'lik bir oksijen ilavesi ile is emisyonları neredeyse sıfır olur, yakıt tüketimi iyileşir. Fakat oksijen konsantrasyonunun artırılması NO_x emisyonlarını arttırmaktadır.



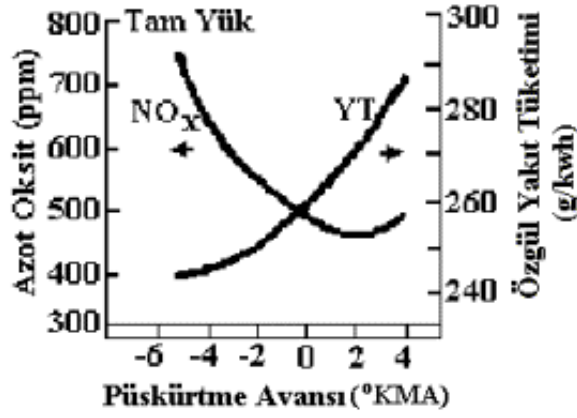
Şekil 6 Püskürtme Avansına Bağlı Olarak (%110 Yükte) Oksijen Konsantrasyonunun Emisyonlara ve Yakıt Tüketimine Etkisi (24).

Oksijen konsantrasyonunun artırılması tutuşma gecikmesini kısaltır. Bu durum püskürtme avansının azaltılmasına imkan sağlar. Avansın azaltılması ile NO_x emisyonları azalır. Avansın 12°'den 6°'ye alınması ve oksijen konsantrasyonunun %21'den %23'e çıkarılması ile NO_x emisyonları artırılmadan partikül emisyonları iyileştirilmektedir (24).

4. MOTOR ÇALIŞMA KARAKTERİSTİKLERİNİN NO_x EMİSYONLARI ÜZERİNEKİ ETKİSİ

4.1. Püskürtme Zamanının Etkisi

Diğer parametreler sabit kabul edilirse, direk püskürtmeli bir dizel motorunda püskürtme başlangıcının bir miktar öne alınması tutuşma gecikmesini arttıracığından bu safhada silindirlere daha fazla yakıt püskürtülecektir. Tutuşma ile birlikte dizel motoru yanma süreçlerinden biri olan ani yanma periyodunda birim krank derecesi başına düşen basınç değişimi (dp/dα) aşırı derecede artacağından çevrimin maksimum sıcaklığı ve basıncı da yükselecektir. Buna bağlı olarak NO_x emisyonlarında bir artış olacaktır (25). Şekil 7'de püskürtme avansına bağlı olarak NO_x emisyonlarının ve özgül yakıt tüketiminin değişimi görülmektedir.



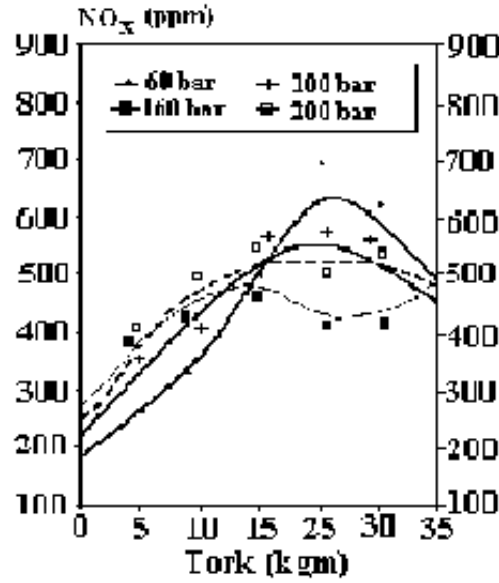
Şekil 7 Püskürtme Avansının NO_x ve Yakıt Tüketimine Etkisi (26).

Püskürtme avansının azaltılması NO_x emisyonlarını azaltarak, is oluşumunu arttırır. Bu durum püskürtme basıncının arttırılmasını gerektirir. Dolayısıyla malzeme dayanımı ve yakıt sisteminin fiyatının artması gibi sorunlar ortaya çıkacaktır. Avansın azaltılması silindir içi maksimum basıncı düşürür, fakat yanmamış yakıt miktarı artacağından, yakıt tüketimi kötüleşmektedir. Ayrıca avansın aşırı azaltılması hafif yüklerde teklemeye sebep olmaktadır (14,27,28).

Normal çalışma şartlarında püskürtme avansının ÜÖN'dan 10°-15°önce olması durumunda tutuşma gecikmesi minimumdur. Tutuşma gecikmesindeki artış püskürtmenin daha erken veya daha geç yapılmasından kaynaklanır. Çünkü sıkıştırma zamanındaki havanın sıcaklığı ve basıncı ÜÖN'ya yaklaştıkça önemli miktarda değişir. Eğer püskürtme erken başlarsa, püskürtme başlangıcındaki basınç ve sıcaklık düşük olacağından tutuşma gecikmesi artar. Eğer püskürtme ÜÖN'ya çok yakın yapılırsa, püskürtme başlangıcındaki basınç ve sıcaklık yüksek olmasına rağmen, pistonun alt ölü noktaya (AÖN) doğru hareket edip silindir hacmini genişletmesinden dolayı tutuşma gecikmesi süresi artacaktır. Bu yüzden uygun püskürtme avansı bu iki nokta arasında olmalıdır (8).

4. 2. Püskürtme Basıncının Etkisi

Enjektörler yakıtı silindirlere yüksek basınçta atomize halde püskürten yakıt sistemi elemanlarıdır. Enjektör püskürtme basıncına bağlı olarak püskürtülen yakıt taneciklerinin çapı değişmektedir. Püskürtme basıncı arttıkça yakıtın enjektörden çıkış hızı da artar ve tanecik çapı küçülür. Çap dağılım aralığı daralır, daha üniform tanecikler oluşur. Küçük taneciklerin ataleti daha düşük olduğundan nüfuz mesafeleri daha kısadır. Bunun sonucunda tutuşma gecikmesi kısılacığından NO_x oluşumu azalacaktır (16,29).



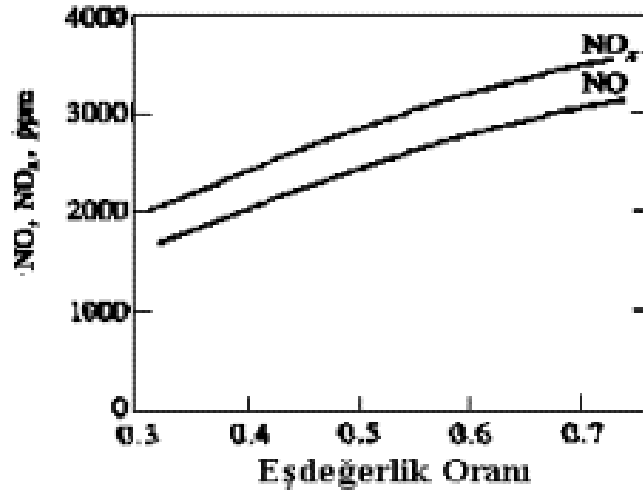
Şekil 8 Değişik Enjektör Püskürtme Basınclarına Bağlı Olarak NO_x Değişimi (30).

Şekil 8’de görüldüğü gibi NO_x oluşumu, tam yük bölgesinde ve düşük püskürtme basınçlarında artma eğilimi göstermektedir. Püskürtme basıncının düşmesi ile yakıt tanecik çapı büyümektedir. Tanecik çapının büyümesi ise tutuşma gecikmesi periyodunun uzamasına yol açmaktadır. Bu durum tutuşmadan sonraki kontrolsüz yanma periyodu sırasındaki birim krank açısı başına düşen basınç artış miktarını yükselteceğinden, NO_x artışına sebep olmaktadır (31).

4. 3. Eşdeğerlik Oranının Etkisi

Dizel motorlarında silindir içerisinde sıfırdan sonsuza kadar değişen değerlerde hava yakıt oranları mevcuttur. Dolayısıyla önemli olan püskürtülen yakıt miktarı değil yanma öncesi buharlaşan yakıt miktarıdır (16).

Dizel motorlarında güç ayarı motora emilen havanın içine püskürtülen yakıt miktarının değiştirilmesi ile yapılır. Motor gücü azaltılmak isteniyorsa, püskürtülen yakıt miktarı azaltılır. Böylece karışım oranı yük durumuna göre değiştirilmektedir ve motor genelde fakir karışım ile çalışmaktadır. Emisyonlar bakımından ana sorun is ve NO_x üretiminden kaynaklanmaktadır. NO_x emisyonları artan yüke bağlı olarak artış gösteren sıcaklıklar nedeniyle artmaktadır (10). NO oluşumu, eşdeğerlik oranı 0,9 ile 1,0 arasında iken maksimum olur (32).

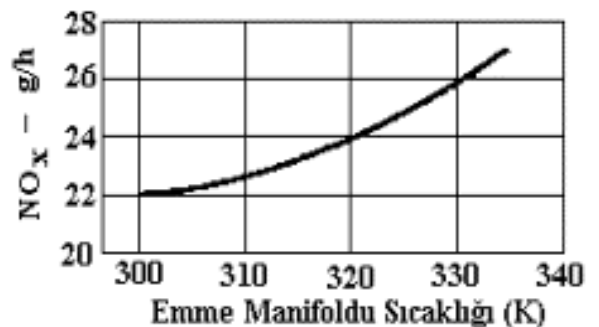
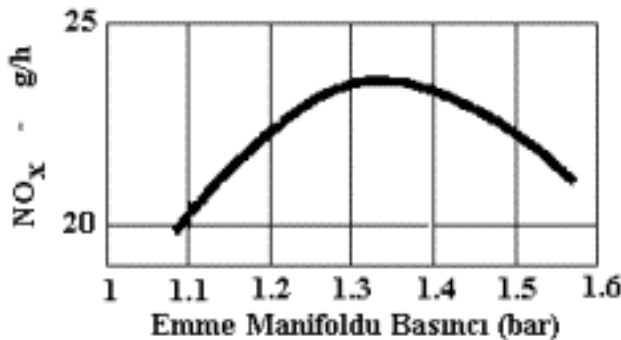


Şekil 9 Eşdeğerlik Oranına Bağlı Olarak NO_x ve NO Konsantrasyonları (8).

Şekil 9'da eşdeğerlik oranının NO_x konsantrasyonuna etkisi görülmektedir. Eşdeğerlik oranı arttıkça ağır yüklerde maksimum basıncın (dolayısıyla maksimum sıcaklığın) artması karışımın daha geniş bir bölgede stokiometrik orana yakın bir değerde yanmasını sağlar. Bu durumda NO_x oluşumu artacaktır. Eşdeğerlik oranının azaltılması ile NO_x emisyonları azalır. Fakat dizel motorlarında yakıtın düzgün püskürtülememesinden dolayı bu azalış fazla değildir (33).

4.4. Dolgu Sıcaklığının ve Basıncının Etkisi

Şekilde dolgu basıncı ve sıcaklığının NO_x ve is emisyonlarına etkisi görülmektedir. Düşük dolgu sıcaklığı ve basıncında NO_x ve is emisyonları da düşüktür. Dolgu basıncı ve sıcaklığının artırılması tutuşma gecikmesini kısaltır. Yakıtın püskürtülmesi sırasında silindir içi sıcaklığının daha fazla olmasına dolayısıyla NO_x emisyonlarının artmasına sebep olur. Dolum havasının soğutulması NO_x emisyonlarının azaltılmasını sağlar. Dolum basıncının artırılması ile NO_x'ler önce artar, daha sonra düşer.



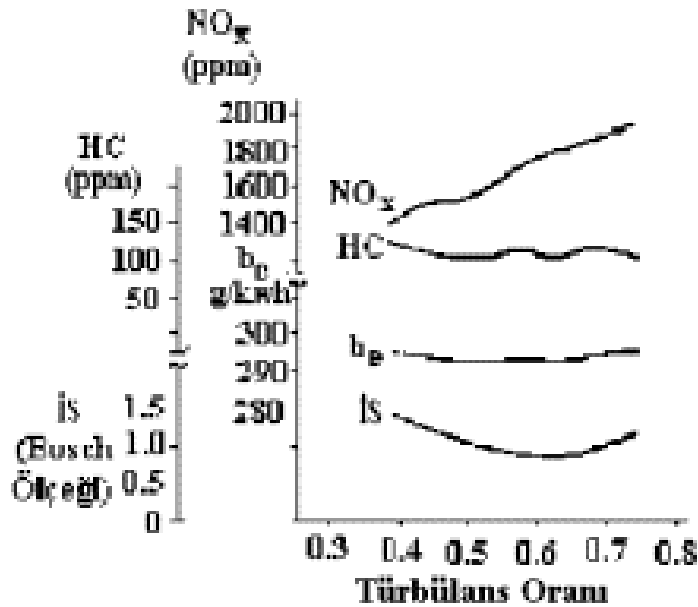
Şekil 10 Dolgu Sıcaklığının ve Basıncının NO_x 'lere Etkisi (13).

Dolum basıncının artırılması ile NO_x oluşumunu arttıran faktörler; lokal oksijen ve azot miktarının ve yakıt spreyinin sınır tabakalarındaki dağılımının artmasıdır. Bu etki alev alanını arttırarak birim zamanda yanan kütle miktarını arttırır. Dolayısıyla NO_x oluşumu artar. Diğer yandan dolum basıncının arttırılarak sıcaklığının azaltılması ve yoğunluğu fazla olan hava içinde yakıt spreyinin dağılmasının azaltılması, yakıt spreyinin karşısındaki lokal hava yakıt oranlarını azaltacağından NO_x oluşumu azaltılmış olur (13).

4. 5. Türbülans Etkisi

Türbülans oranının değiştirilmesi yakıtın buharlaşmasına ve hava yakıt karışım işlemine etkir. Ayrıca sıkıştırma süresince silindir cidarı ısı transferine ve püskürtme sırasındaki sıcaklığa etkir. Normal çalışma sırasında türbülans oranındaki değişimin tutuşma gecikmesi üzerindeki etkisi küçüktür. Türbülans ile motorun ilk çalışması sırasında yüksek buharlaşma ve karışım elde edildiğinden bu etki daha önemlidir (34).

Türbülans oranının azaltılması ile yakıt ve havanın karışması için gerekli zaman arttırılmış olur. Böylece yakıt damlacıklarının etrafındaki oksijen konsantrasyonu azalır. Sonuçta yanma sıcaklığı aşırı yükselmez. Ancak ısı verim kötüleşir (22).

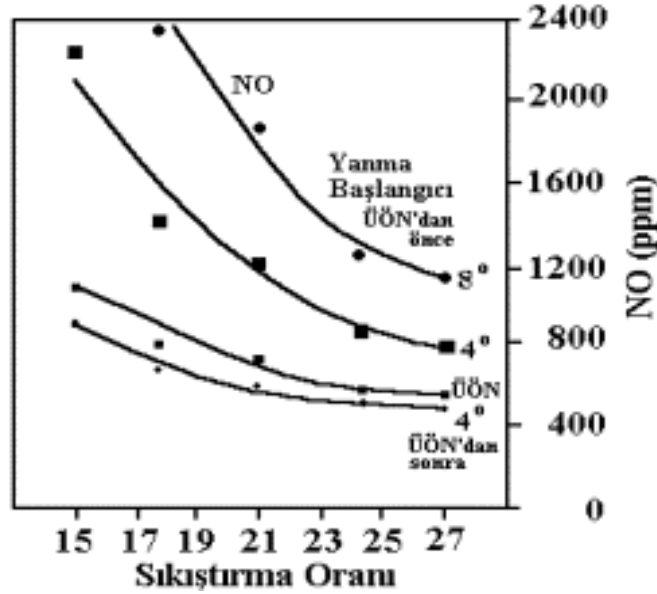


Şekil 11. Türbülans Oranının İS ve NO_x 'lere Etkisi (11).

Şekil 11'de Türbülans oranının is ve NO_x 'lere etkisi görülmektedir. Dolgu hareketinin azaltılması püskürtülen yakıtın hava ile karışmasını azaltır. Yanan karışım bölgesindeki yanmamış karışım miktarını arttırır. Sonuçta NO_x

emisyonları azalacaktır. Fakat iş emisyonları artacaktır. İş emisyonlarının azaltılabilmesi için püskürtme basıncı artırılmalıdır (35).

4.6. Sıkıştırma Oranının Etkisi



Şekil 12. Sıkıştırma Oranı Değişiminin NO Emisyonlarına Etkisi (36)

Bu değişken tutuşma gecikmesini kontrol eder. Direk püskürtmeli dizel motorlarında NO oluşumuna etkiyen önemli faktörlerden biridir. Şekil 12'de 1400 devir/dakika'da 15:1-27:1 aralığında değişen sıkıştırma oranının, NO emisyonlarına etkisi görülmektedir.

Püskürtme avansının sabit kalması şartıyla, sıkıştırma oranının azaltılması tutuşma gecikmesini uzatacaktır.

Dolayısıyla bu süre boyunca püskürtülen yakıt miktarı artacağından silindir içi maksimum sıcaklık yükselecek ve buna bağlı olarak NO oluşumu artacaktır. Sıkıştırma oranının artırılması ile tutuşma gecikmesi kısılacığından NO oluşumu azalacaktır. Fakat sürtünme işi artacağından çevrim verimi kötüleşecektir (36).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

NO_x emisyonları stokiyometrik orana yakın karışımların yanması sonucu oluşur. Dizel motorlarında maksimum güç ile maksimum tork arasındaki devir aralığında hava yakıt oranı stokiyometrik orana yakın olduğundan bu devir aralığında NO_x emisyonları önemli derecede artacaktır. NO_x emisyonlarının azaltılmasında kullanılan mevcut yöntemler yakıt ekonomisi, yanmamış HC ve PM emisyonları gibi diğer parametreleri kötüleştirir. Bu sebeple NO_x kontrol yöntemlerinin birkaçı beraber kullanılarak hem NO_x emisyonları hem de diğer parametreler optimize edilmelidir.

KAYNAKLAR

1. Saraçoğlu, S., Borat, O., Gönülata, B., Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği, Marmara Bölgesinde Çevre Kirlenmesi Semineri, İstanbul Ticaret Odası Seminerler Dizisi No:1, Ağaoğlu Kitabevi, İstanbul, 27-30 Eylül 1977.
2. Air Quality Criteria for Nitrogen Oxides, U.S. Environmental Protection Agency Report No: EPA 600/8-82-06, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1982.
3. De Neuers, N., Air Pollution Control Engineering, McGraw-Hill International Editions, Singapore, 1995.
4. Demirsoy, M., Benzin ve Dizel Motorları Egzoz Gazlarının Temizlenmesi İçin Alınan Tedbirler, Dokuz Eylül Üniversitesi Denizli Mühendislik Fakültesi, Denizli.
5. Borat, O., Balcı, M., Sürmen, A., Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları-3, Ankara, 1994.
6. Leuckel, W., Schadstoffbildung bei industriellen Verbrennungsanlagen und primäre Minderungsmaßnahmen, 1. Tecflam Seminer, Heidelberg, 1985.
7. De Soete, G., Physikalisch-Chemische Mechanismen beider Stickoxidbildung in industriellen Flammen Gas Wärme international, Bond 30 1981.
8. Heywood, J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1988.
9. Khan, I.M., Wang, C.H.T., Factors Affecting Emissions of Smoke and Gaseous Pollutants from Direct Injection Diesel Engines, Lucas Engineering Review, Vol.6, No.2, November, 1973.
10. Ergeneman, M., Arslan, H., Kutlar, O.A.(ed.), Mutlu, M., Taşıt egzozundan kaynaklanan kirleticiler, Birsan Yayınevi, İstanbul, 1998.
11. Schafer, F., Basshuysen, R. V., Reduced Emissions and Fuel Consumption in Automobile Engines, Springer-Verlag Press, Germany, 1995.
12. Zelenka, P., Kriegler, W., Herzog, P. L., Cartellieri, W. P., Ways Toward the Clean Heavy-Duty Diesel, SAE Paper No:900602, 1990.

13. Herzog, P.L., Bürgler, L., Winklhofer, E., Zelenka, P., Cartellieri, W., [NO_x Reduction Strategies for DI Diesel Engines](#), SAE Paper No: 920470, 1992.
14. Chan, M., Das, S., Reitz, R.D., [Modelling Multiple Injection and EGR Effects on Diesel Engine Emissions](#), SAE Paper No: 972864, 1997.
15. Bilginpek, H., [Dizel Motorları](#), THK Basımevi, 1989, Ankara.
16. Borat, O., Balci, M., Sürmen, A., [İçten Yanmalı Motorlar](#), DAYM Matbaası, Cilt 1, Ankara, 1992.
17. İcingür, Y., Salman, M.S., İçten Yanmalı Motorlardan Kaynaklanan Emisyonlar ve Kontrol Yöntemleri, [2. Ulusal Yanma ve Hava Kirliliği Sempozyumu](#) Sayfa: 115-130, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 27-29 Eylül 1993.
18. Ladommatos, N., [NO_x Control Using Egr](#), Brunel University of West London.
19. Kohketsu, S., Mori, K., Sakai, K., Hakozaiki, T., [EGR Technologies for a Turbocharged and Intercooled Heavy-Duty Diesel Engine](#), SAE Paper No: 970340, 1997.
20. Narusawa, K., Odaka, M., Koike, N., Tsukamat, Y., Yoshida, K., [An EGR Method for Heavy-Duty Diesel Engines Under Transient Operations](#) SAE Paper No: 900444, 1990.
21. Shimazaki, N., Hatanaka, H., Yokota, K., Nakahira, T., [A Study of Diesel Combustion Process Under The Condition of EGR and High-Pressure Fuel Injection with Gas Sampling Method](#), SAE Paper NO: 960030, 1990.
22. Newton, K., Steeds, W., Garrett, T.K., [The Motor Vehicle](#), Butterworth Heinemann Press, England, 1996.
23. Korimi, E. R., [A Short Course on Diesel Particulates and NO_x Emissions](#), University of Leeds, 3-7 April 1995, Leeds, U.K.
24. Lida, N., Sato, G.T., [Temperature and Mixing Effects on NO_x and Particulate](#), SAE Paper No: 880424, 1988.
25. Khan, I.M., Matula R.A., [13 th Symposium \(International\) on Combustion](#), Pittsburg, Pem, 1971.
26. Andreews, G., [NO_x Formation and Control in Diesel Engines. A Short Course on Diesel Particulates and NO_x Emissions](#), University of Leeds, 3-7 April 1995, Leeds, U.K.
27. Auston, E.W., Lyn, W.T., [Relation between Fuel Injection and Heat Release in a Direct Injection Engine and](#)

- [the Nature of the Combustion Processes, Proceedings Institution of Mechanical Engineers \(A.D.\), London, Vol. 1, 1960-61, pp 47-62.](#)
28. Needhan, J.R., Nicol, A.J., Such, C.H., [Low Emission Heavy Duty Diesel Engine for Europe](#), SAE Paper No: 932959, 1993.
29. Horrochs, R.W., [Light Duty Diesels-An Update on The Emissions a Challenge](#), Proc. Inst. Mec.Eng. Vol.208, 1994.
30. İcingür, Y., Çelikten, İ., Salman, M.S., Koca, A., Dizel Motorlarında Servis Koşullarından Kaynaklanan Emisyonların Deneysel Olarak İncelenmesi, [3. Yanma ve Hava Kirliliği Sempozyumu](#), Sayfa: 156-167, 11-13 Eylül 1995, ODTÜ Çevre Müh., Ankara.
31. İcingür, Y., Balcı, M., Çelikten, İ., Dizel Motorlarında İşletme Parametrelerinin Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, [1. Ulusal Ulaşım Sempozyumu](#) Sayfa: 521-530, 6-7 Mayıs 1996, İstanbul.
32. Merker, G.P., Hohlbaum, B., Rauscher, M., [Two-Zone Model for Calculation of Nitrogen-Oxide Formation in Direct-Injection Diesel Engines](#), SAE Paper No: 932454, 1993.
33. Viiculescu, I. A., Borman, G. L., [An Experimental Study of Diesel Engine Cylinder-Averaged Nox Histories](#), SAE Paper No: 780228, 1978.
34. Furuham, S., Tateishi, Y., [Gases in Piston Top-Land Space of Gasoline Engine](#), Trans. SAEJ NO: 1972.
35. Thien, G.E., [Development Work on Intake and Exhaust Ports of Four Stroke Diesel Engines](#), Österreichische Ingenieur-Zeitschrift, Heft 9, 1965.
36. Middlemiss, I.D., [Characteristics of the Perkins 'Squish Lip' Direct Injection Combustion System](#), SAE Paper No: 780113, 1978.